

可见光通信系统中基于星座点裂变的非等概率星座研究

郭心悦, 杨宇帆

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对可见光通信系统提出一种基于星座点裂变的非等概率正交幅度调制 (QAM) 方案, 并研究了信源熵均为6的偶数阶非等概率68QAM (NEP-68QAM) 和奇数阶NEP-69QAM星座。与基于非线性编码的NEP-72QAM星座相同, NEP-68QAM和NEP-69QAM均实现了比等概率64QAM星座更大的最小欧氏距离。但是, NEP-68QAM和NEP-69QAM的峰均功率比值相比NEP-72QAM更低, 且实现更简单。进一步, 搭建了实验平台来评估2种星座在真实可见光信道中的性能。当发光二极管 (LED) 的非线性效应较弱时, 受益于完全的格雷编码, NEP-68QAM的误码率最低。当LED出现严重的非线性失真时, NEP-69QAM的抗非线性能力最强, 故而性能最佳。考虑 3.8×10^{-3} 的误码率阈值, 当直流偏置电流为150 mA时, 与NEP-72QAM和64QAM相比, NEP-68QAM的峰峰值电压 (V_{pp}) 工作范围分别提升了7.8%和31.7%, NEP-69QAM的 V_{pp} 工作范围分别提升了16.9%和42.9%。

关键词: 可见光通信; 正交幅度调制; 非等概率星座; 发光二极管非线性

中图分类号: TN929.12

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025192

Research on non-equal probability constellation based on constellation point fission in visible light communication System

GUO Xinyue, YANG Yufan

School of Optical-Electrical and Computing Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: A non-equal-probability quadrature amplitude modulation (QAM) scheme was proposed based on constellation point fission for visible light communication systems, in which the even-order non-equal-probability 68QAM (NEP-68QAM) and odd-order NEP-69QAM constellations with source entropy of 6 were studied. Similar to the NEP-72QAM constellation based on nonlinear encoding, both the NEP-68QAM and NEP-69QAM achieved a larger minimum Euclidean distance than the equal-probability 64QAM constellation. However, the peak-to-average power ratio of NEP-68QAM and NEP-69QAM was lower than that of NEP-72QAM, and they were easier to implement. Furthermore, an experimental demonstration was built to evaluate the performance of the two non-equal-probability constellations in the practical visible light channel. When the nonlinear effect of the light emitting diode (LED) was weak, NEP-68QAM achieved the lowest bit error rate due to the complete Gray coding. When severe nonlinear distortion of the LED appeared, NEP-69QAM had the strongest anti-nonlinear capability and thus offered the best performance. Considering a bit error rate threshold of 3.8×10^{-3} , when the DC bias current was 150 mA, compared with the NEP-72QAM and 64QAM, the peak-to-peak voltage (V_{pp}) operating range of the NEP-68QAM scheme increased by 7.8% and 31.7% respectively, while the V_{pp} operating range of the NEP-69QAM scheme increased by 16.9% and 42.9% respectively.

Keywords: visible light communication, QAM, non-equal probability constellation, LED nonlinearity

收稿日期: 2025-08-15; 修回日期: 2025-10-09

通信作者: 郭心悦, xinyueguo@usst.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61501296)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61501296)

0 引言

随着 5G 商业化的全面推进,下一代 6G 通信技术的研发已全面展开。针对移动网络数据高速增长与射频频谱日益紧缺的矛盾,6G 将超越当前的无线频谱,充分利用低中高全频段频谱资源,实现空地一体化的全球通信网络。在此背景下,380~780 nm 波长的可见光通信技术迅猛发展,被国际电信联盟纳入 6G 候选技术库^[1]。可见光通信是一种利用发光二极管(LED, light emitting diode)作为发射器的无线通信技术,通过 LED 光源产生的不同光强来实现信息传输。相比于传统的射频通信技术,可见光通信具有频谱资源丰富、不需要频谱授权、通信安全可靠、成本低、无电磁干扰等优点^[2-3]。

可见光通信系统的性能主要受限于 LED 的固有属性,其中 LED 有限的调制带宽以及驱动电压与电流之间的非线性关系起主导作用^[4-5]。现阶段,商用 LED 的调制带宽在几兆赫兹到几十兆赫兹,大大限制了可见光通信系统的传输速率。为提升数据传输速率,一种直接且有效的方式是使用高阶调制格式。然而,调制阶数的升高导致星座的最小欧氏距离(MED, minimum Euclidean distance)减小,系统的抗噪声能力变差。同时,高阶调制信号的峰均功率比(PAPR, peak to average power ratio)更高,导致 LED 的非线性失真更为严重。

为解决上述问题,星座整形技术被广泛应用于可见光通信系统。星座整形包括几何整形和概率整形,分别通过优化星座点的空间位置和概率分布来提升系统性能。文献[6]探究了不同形状的 8 阶正交幅度调制(8QAM, 8-quadrature amplitude modulation)星座的性能,提出 PAPR 低的圆形星座尤其适用于非线性失真严重的可见光通信系统。文献[7]提出一种三角形几何形状的 16QAM 方案来增大 MED 并对抗 LED 的非线性失真。然而,上述几何整形星座大多存在一个问题,即星座点分布不能同时关于 I 轴和 Q 轴对称,调制信号存在直流分量或离散功率谱密度分量,降低了系统的能量利用率。此外,不规则的星座点分布也会给信号的调制解调带来更大的复杂度。因此,更多的研究集中于概率整形技术。文献[8]将概率整形应用于波分复用的可见光通信系统中,数据速率相比传统自适应系统提升 25%。文献[9]验证了概率整形在三维调制系统中抗噪声和抗非线性 2 个方面的性能优势。虽然

概率整形技术性能优越,但是,生成概率整形信号的恒定组合分布匹配器基于算术编码原理,复杂度 high 且需要消耗大量硬件资源。

近来,一些研究者提出使用其他编码方式来生成非等概率信号,不仅大幅降低了计算复杂度,而且在提升系统性能方面仍然优势明显。文献[10]提出一种符号级概率整形技术来降低信号生成的计算复杂度和硬件开销。但是,这种方法需要增添冗余符号,降低了传输效率。文献[11]提出使用霍夫曼编码生成非等概率 64QAM 信号,在非线性激光可见光信道中获得了显著增益。文献[12]用霍夫曼编码在叠加的多输入多输出系统中实现非整数调制阶数,显著提升了系统吞吐量。然而,霍夫曼编码是一种非等长编码,在解码时会产生误差传递。文献[13]提出用非线性编码生成非等概率 36QAM 信号来提升系统对非线性的鲁棒性。文献[14]研究了基于非线性编码的非等概率 72QAM 星座,同时提升了系统的抗噪声和抗非线性性能。与比特级概率整形和霍夫曼编码不同,非线性编码通过增大调制阶数来实现信源的非等概率分布,故而信源熵保持不变。但是,非线性编码很难直接生成四象限对称的非等概率星座,而且对星座点个数和概率的调整都较为困难。

受非线性编码的启示,本文提出一种基于星座点裂变的非等概率正交幅度调制方案,通过星座点裂变,将一个大功率星座点裂变成 2 个概率减半的小功率星座点,得到非等概率信号。由于星座点裂变,信号调制阶数增大,但信源熵保持不变。相比于非线性编码,该方案能够直接生成四象限对称的非等概率星座,且可以任意选择非等概率星座点的概率和个数,甚至能生成奇数阶的调制信号。此外,由于不需要引入额外的编解码,计算复杂度也大大降低。不失一般性,本文研究了 2 种信源熵均为 6 bit 的非等概率星座,分别为偶数阶的非等概率 68QAM (NEP-68QAM, non-equal-probability 68QAM) 和奇数阶的 NEP-69QAM。2 种星座均以传统方形结构的星座为基本形状,并保证星座点的分布在 4 个象限中完全对称。与等概率 64QAM 星座相比,提出的 2 种非等概率星座不仅具有更大的 MED,且星座的 PAPR 更低。与基于非线性编码的 NEP-72QAM 星座相比,提出 2 种星座的 PAPR 更低,且实现复杂度更低。

NEP-68QAM 能够实现完全的格雷编码, 因而能获得更大的格雷编码增益, 而 NEP-69QAM 的 PAPR 更低, 因此抗非线性能力更强。最后, 本文搭建了实验系统对提出的 2 种非等概率星座的性能进行了评估。实验结果验证了所提星座相比于 NEP-72QAM 和 64QAM 的优越性。当 LED 非线性较弱时, NEP-68QAM 性能最佳; 当 LED 产生严重的非线性失真时, NEP-69QAM 具有最优的误码率 (BER, bit error rate) 性能。

1 原理

1.1 基于星座点裂变的非等概率星座设计

图 1 展示了 NEP-68QAM 星座的设计过程。该方案选择 64QAM 星座中功率最大的 4 个星座点 (概率均为 $\frac{1}{64}$), 将它们裂变为 8 个概率为 $\frac{1}{128}$ 的星座点, 如图 1 中空心星座点所示, 分别放置于图 1(b) 所示位置。经过裂变后, 星座点个数由原来的 64 个变为 68 个, 仍然能保证星座点的分布同时关于 I 轴和 Q 轴对称, 即在 4 个象限中完全对称。

图 2 为 NEP-69QAM 星座的设计过程。该方案将传统 64QAM 星座中 5 个大功率星座点进行裂变得得到 10 个概率减半的星座点, 即一共 69 个星座点。由于 69 为奇数, 无法均匀分布在 4 个象限中, 需进一步对 69 个星座点进行星座整形, 得到如图 2(c) 所示的 NEP-69QAM 星座。可以看出, 为保持方形的星座结构且星座点能均匀对称地分布在 4 个象限内, 选择将部分星座点放置在 I 轴或 Q 轴上。特别地, 为保证所有星座点同时关于 I 轴和 Q 轴对称以避免信号的直流分量, 将 2 个概率为 $\frac{1}{128}$ 的星座点放置在 Q 轴上。

1.2 基于星座点裂变的非等概率信号生成

基于星座点裂变的非等概率 QAM 信号生成原理如图 3 所示, 信号生成包括以下 3 个步骤。

步骤 1 比特分组。将输入的二进制比特以 6 bit 为一组对应一个符号, 即每个符号的信息量为 6 bit。

步骤 2 添加冗余比特。对 6 bit 的比特组添加一位冗余比特构成 7 bit 的比特组。冗余比特添加规

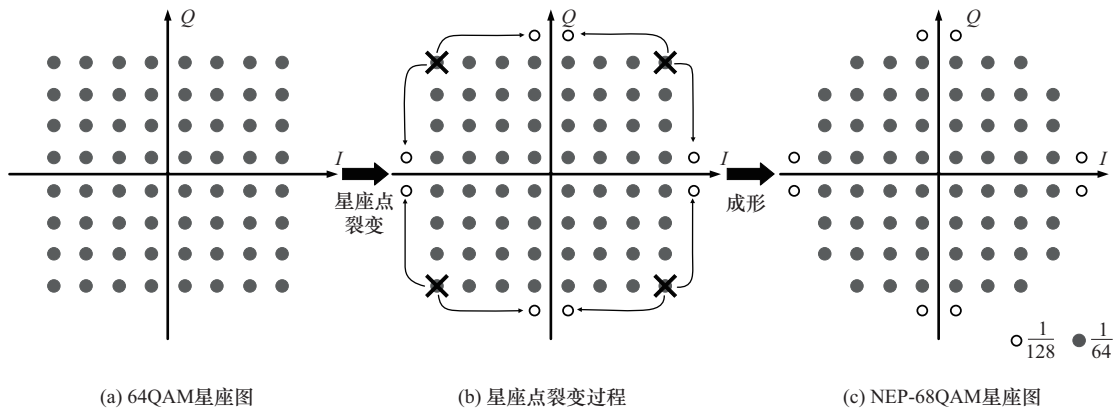


图 1 NEP-68QAM 星座的设计过程

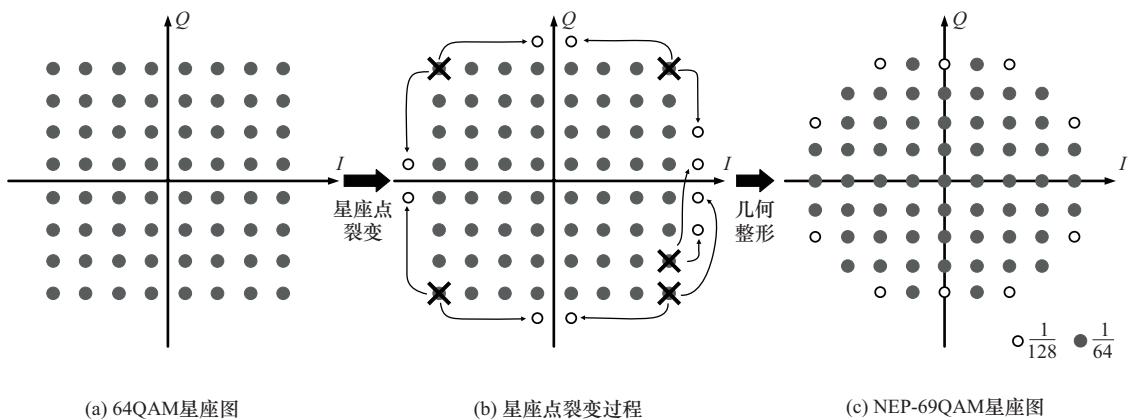


图 2 NEP-69QAM 星座的设计过程

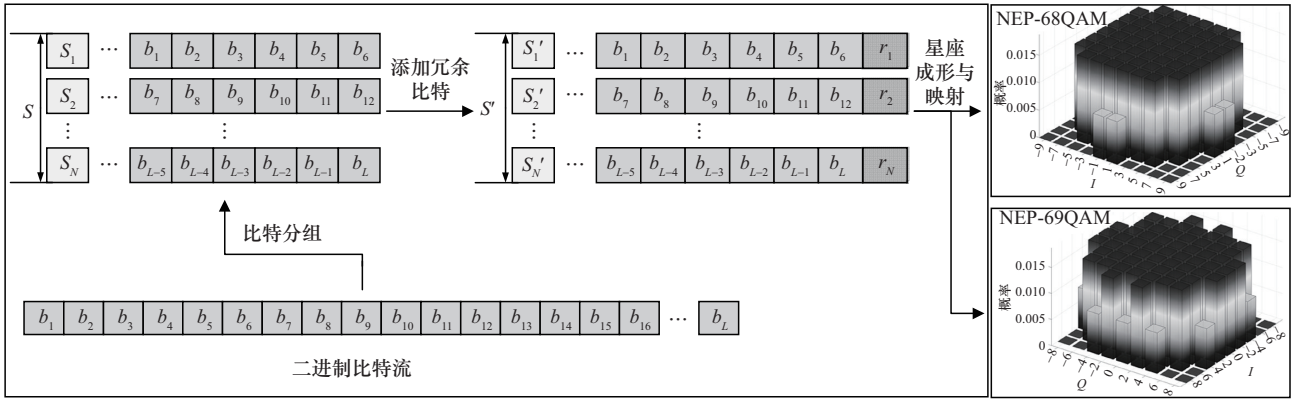


图3 基于星座点裂变的非等概率QAM信号生成原理

则如下：对于NEP-68QAM信号，当6 bit的比特组为000100、100100、100000、000000时，分别以等概率随机添加冗余比特0或1，其余比特组均添加冗余比特0；对于NEP-69QAM信号，当6 bit的比特组为111111、101001、101110、011111、110111时，分别以等概率随机添加冗余比特0或1，其余比特组均添加冗余比特0。

步骤3 星座形成与映射。根据图1(c)和图2(c)

所示经过星座点裂变并进行整形的星座图，完成二进制比特到QAM信号的映射，生成由I分量和Q分量构成的QAM信号。表1和表2分别列出了NEP-68QAM与NEP-69QAM的比特符号的映射，其中QAM符号的坐标值在MED假设为1的条件下得到，其中j为虚数单位。

在上述过程中，步骤2中额外添加的第7 bit为冗余比特，其目的是便于生成非等概率信号，故而

表1 NEP-68QAM比特符号映射

符号	比特	符号	比特	符号	比特	符号	比特
0.5+0.5j	1101100	-0.5+0.5j	0101100	-0.5-0.5j	0100100	0.5-0.5j	1100100
1.5+0.5j	1111100	-1.5+0.5j	0111100	-1.5-0.5j	0110100	1.5-0.5j	1110100
2.5+0.5j	1011100	-2.5+0.5j	0011100	-2.5-0.5j	0010100	2.5-0.5j	1010100
3.5+0.5j	1001100	-3.5+0.5j	0001100	-3.5-0.5j	0000100	3.5-0.5j	1000100
4.5+0.5j	1001000	-4.5+0.5j	0001000	-4.5-0.5j	0000000	4.5-0.5j	1000000
0.5+1.5j	1101110	-0.5+1.5j	0101110	-0.5-1.5j	0100110	0.5-1.5j	1100110
1.5+1.5j	1111110	-1.5+1.5j	0111110	-1.5-1.5j	0110110	1.5-1.5j	1110110
2.5+1.5j	1011110	-2.5+1.5j	0011110	-2.5-1.5j	0010110	2.5-1.5j	1010110
3.5+1.5j	1001110	-3.5+1.5j	0001110	-3.5-1.5j	0000110	3.5-1.5j	1000110
0.5+2.5j	1101010	-0.5+2.5j	0101010	-0.5-2.5j	0100010	0.5-2.5j	1100010
1.5+2.5j	1111010	-1.5+2.5j	0111010	-1.5-2.5j	0110010	1.5-2.5j	1110010
2.5+2.5j	1011010	-2.5+2.5j	0011010	-2.5-2.5j	0010010	2.5-2.5j	1010010
3.5+2.5j	1001010	-3.5+2.5j	0001010	-3.5-2.5j	0000010	3.5-2.5j	1000010
0.5+3.5j	1101000	-0.5+3.5j	0101000	-0.5-3.5j	0100000	0.5-3.5j	1100000
1.5+3.5j	1111000	-1.5+3.5j	0111000	-1.5-3.5j	0110000	1.5-3.5j	1110000
2.5+3.5j	1011000	-2.5+3.5j	0011000	-2.5-3.5j	0010000	2.5-3.5j	1010000
0.5+4.5j	1001001	-0.5+4.5j	0001001	-0.5-4.5j	0000001	0.5-4.5j	1000001

表2 NEP-69QAM比特符号映射

符号	比特	符号	比特	符号	比特	符号	比特
1+0j	0000000	0+1j	0010010	-1+0j	0001010	0-1j	1000010
2+0j	0000100	-1+1j	0011010	-2+0j	0001000	1-1j	1000000
3+0j	0000110	-2+1j	0011000	-3+0j	0001100	2-1j	1000100
4+0j	1010110	-3+1j	0011100	-4+0j	0001110	3-1j	1000110
1+1j	0010000	-4+1j	0011110	-1-1j	1001010	4-1j	1011110
2+1j	0010100	0+2j	0110010	-2-1j	1001000	0-2j	1100010
3+1j	0010110	-1+2j	0111010	-3-1j	1001100	1-2j	1100000
4+1j	1010100	-2+2j	0111000	-4-1j	1001110	2-2j	1100100
1+2j	0110000	-3+2j	0111100	-1-2j	1101010	3-2j	1100110
2+2j	0110100	-4+2j	0111110	-2-2j	1101000	4-2j	1101110
3+2j	0110110	0+3j	0100010	-3-2j	1101100	0-3j	1110010
4+2j	0111110	-1+3j	0101010	-4-2j	1101110	1-3j	1110000
1+3j	0100000	-2+3j	0101000	-1-3j	1111010	2-3j	1110100
2+3j	0100100	-3+3j	0101100	-2-3j	1111000	3-3j	1110110
3+3j	0100110	0+4j	1010010	-3-3j	1111100	0-4j	1010011
1+4j	1011000	-1+4j	0101110	-1-4j	1011010	1-4j	1010000
2+4j	1011101	-2+4j	1111110	-2-4j	1011100	2-4j	1111111
0+0j	0000010						

仅前 6 bit 为有效位。因此，在比特符号映射中，只需保证前 6 bit 尽可能满足格雷映射。如表 1 所示，NEP-68QAM 星座能实现完全的格雷映射，但是表 2 中给出的 NEP-69QAM 星座则不能实现比特到符号的完全格雷编码，因而存在格雷编码增益损失。在接收端，当执行 QAM 信号解映射时，只需取前 6 bit 信息位即可。由于每一个非等概率信号对应于 6 bit 二进制信息，因此，即使调制阶数增大了，NEP-68QAM 和 NEP-69QAM 的信源熵仍为 6 bit/symbol。

2 仿真

本文首先通过理论仿真来验证 2 种非等概率信号的性能。除了等概率 64QAM 方案，本文还引入了基于非线性编码的 NEP-72QAM 方案^[14]进行对比，所有方案的信源熵均为 6 bit/symbol。表 3 列出了不同星座的主要性能参数，这些参数均是在星座功率归一化的情况下求得的，MED 为星座抗噪声性能的主要指标，PAPR 是衡量星座抗 LED 非线性的主要性能指标。

表3 不同星座的 MED 和 PAPR 性能比较

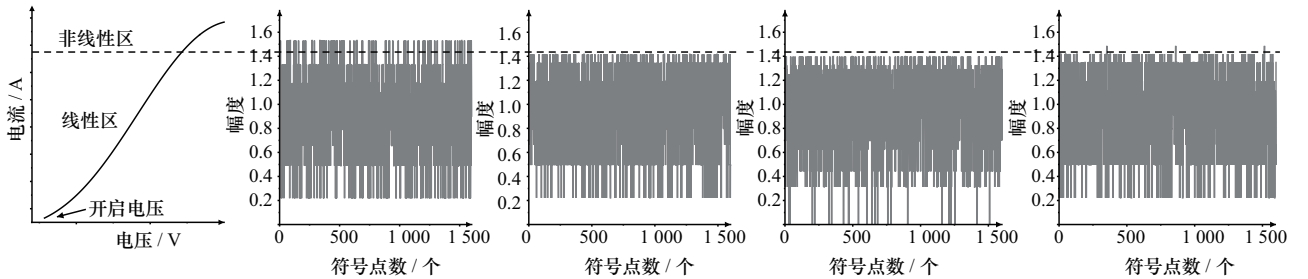
方案	MED	PAPR /dB
NEP-68QAM	0.312 3	3.010 2
NEP-69QAM	0.312 3	2.903 0
64QAM	0.308 6	3.679 8
NEP-72QAM	0.312 2	3.410 8

表 3 中，星座 MED 和 PAPR 定义分别为^[6]

$$\text{MED}_{\text{const}} = \min_{i \neq n} |x_i - x_n|, i=1, \dots, K, n=1, \dots, K \quad (1)$$

$$\text{PAPR}_{\text{const}} = \frac{\max |x_i|^2}{\text{E}[|x_i|^2]}, i=1, \dots, K \quad (2)$$

其中， $\text{E}[\cdot]$ 表示求数学期望运算， x_i 和 x_n 分别表示第 i 个和第 n 个星座点的复数坐标， K 表示星座点个数。由于 3 种非等概率星座中大部分星座点的概率与 64QAM 星座点的概率相同，而且也都是方形的星座结构，因此，3 种非等概率星座的 MED 相比 64QAM 只有小幅度的提升，且它们的 MED 相同。但是，在星座 PAPR 性能方面，NEP-68QAM 和 NEP-69QAM 明显优于 64QAM 和 NEP-72QAM，且 NEP-69QAM 的星座 PAPR 最低。



(a) LED伏-安特性曲线 (b) 64QAM信号幅值曲线 (c) NEP-68QAM信号幅值曲线 (d) NEP-69QAM信号幅值曲线 (e) NEP-72QAM信号幅值曲线
图4 不同调制方案信号幅值对比

图4进一步展示了LED的伏-安(V-I, volt-ampere)特性曲线及不同调制方案信号的幅值曲线来表达PAPR与LED非线性失真的关系。在可见光通信系统中,发送信号以电压形式驱动LED并通过光强进行传输。根据图4(a)所示的LED伏-安特性曲线^[15],LED驱动电压与正向电流之间的非线性关系会导致2种信号出现失真现象:一种是驱动电压低于开启电压所导致的信号削波失真;另一种是当驱动电压较大时,由电转换到光的过程中出现的非线性映射。信号的削波失真可以通过添加直流偏置来避免。但是,电光转换的非线性映射不可避免。当驱动电压高于开启电压时,电流随着驱动电压的增加呈指数级增长,LED的输出光功率与电流呈线性关系。当驱动电压过高时,即进入伏-安特性曲线非线性区,电压与电流不再呈线性关系,导致发射信号和光功率不再呈线性关系,发射信号产生非线性失真。

图4(b)~图4(e)这4种方案的信号幅值均在信号平均功率为1的情况下得到。星座PAPR越高,信号的峰值越高,从而使信号对应的驱动电压值更大,导致LED工作在非线性区域的概率更大。如图4所示,64QAM的星座PAPR最高,其信号峰值明显高于其他3种方案,最容易产生非线性失真。虽然NEP-72QAM的PAPR也较大,但其高信号出现的概率不大。相比64QAM和NEP-72QAM,NEP-68QAM和NEP-69QAM星座均具有更低的信号峰值,尤其是NEP-69QAM具有最低的PAPR。

图5比较了4种不同星座的误符号率(SER, symbol error rate)性能。仿真中,假设信道为高斯白噪声信道,即仿真仅体现不同方案的抗噪声性能,无法反映其抗非线性失真的能力。在这种情况下,SER性能主要由MED决定。由于3种非等概

率方案MED几乎相同且均略大于64QAM方案,因此,它们的SER性能也相同,均略优于64QAM方案。

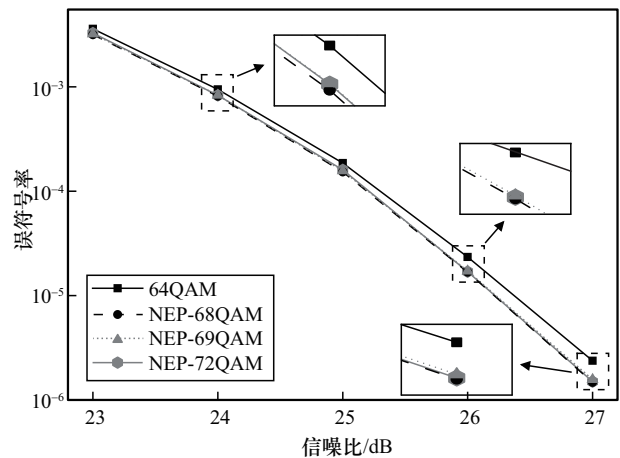


图5 不同调制方案的误符号率性能比较

进一步地,图6给出了不同星座的BER性能比较。BER性能同样主要取决于MED,此外,还与符号到比特的格雷编码有关。NEP-72QAM、NEP-68QAM和64QAM都能实现完全的格雷编码,故而这3种方案的趋势与SER结果接近。但是NEP-69QAM不能达到完全的格雷编码,因此在BER性能上会有所损失。如图6所示,当信噪比为24 dB时,NEP-68QAM和NEP-72QAM的BER性能最佳。虽然NEP-69QAM星座的MED大于64QAM,但是因为格雷编码增益的损失,其BER性能和64QAM差不多。当信噪比升高至26 dB时,NEP-69QAM星座的BER性能开始超越64QAM,表明当信噪比升高后,格雷编码增益损失逐渐降低,其MED优势逐渐明显。当信噪比达到27 dB的时候,3种非等概率调制方案性能接近,均优于64QAM星座。

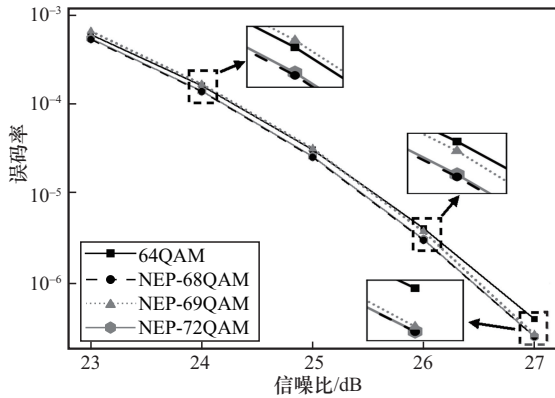


图6 不同调制方案的误码率性能比较

3 实验

3.1 实验装置

为进一步评估NEP-68QAM和NEP-69QAM星座在真实可见光信道中的性能，尤其是信道非线性对不同星座性能的影响，本文进一步搭建了可见光通信实验演示系统，实验装置和系统框架如图7所示。

为了降低发射信号的PAPR，本文实验引入了离散傅里叶变换扩频正交频分复用(DFT-S-OFDM, discrete Fourier transform spread orthogonal frequency division multiplexing)调制技术。在发射端，首先对二进制比特流进行非等概率信号调制，然后执行M点离散傅里叶变换。之后，生成并插入训练序列以便接收机进行同步和信道估计。经过上采样后，对信号进行共轭对称操作以保证经过N点快速傅里叶逆变换后生成的DFT-S-OFDM信号是实数。最后，在每个DFT-S-OFDM符号块前插入循环前缀以缓解信道频率响应非理想导致的码间串扰。上述步骤均由计算机端的MATLAB软件完成并生成离线信号。

然后，将离线信号导入任意函数发生器(Tektronix AFG3252C)产生电信号，电信号经功率放大器(Mini-Circuit ZHL-6A-S+)放大后添加直流偏置(Mini-Circuits ZFBT-4R2GWFT+)，以保证信号的非负性，最后由混合信号驱动LED(Cree XLamp XP-E)，将电信号转换为光信号。光信号经自由空间传输，在接收端由雪崩光电二极管(Hamamatsu C 12702-11)将光信号重新转换为电信号，随后使用示波器(Tektronix MDO4104C)捕获电信号，送入计算机完成离线信号处理和后续性能分析。

在接收端，首先对接收信号进行帧同步，检测数据流的起始位置。然后，移除循环前缀和进行下采样，并用快速傅里叶变换将信号从时域变换至频域。随后，利用训练序列在频域上进行基于最小二乘准则的信道估计，并由信道均衡补偿信道失真。接着，使用离散傅里叶逆变换完成DFT-S-OFDM信号的解调，并用最大似然准则进行符号估计。最后，对非等概率信号解映射恢复原始的二进制比特流。

在实验中，系统参数设置如下：离散傅里叶变换点数为128，快速傅里叶变换点数为256，循环前缀长度为8。由于功率放大器在低频处的频率响应较差，低频的6个子载波被置零，不用于数据传输。若无特别说明，LED与光电二极管之间的距离为0.8 m，任意函数发生器的采样率设置为100 MSa/s，上采样率设置为4倍，数据传输的净速率为71.5 Mbit/s。

3.2 实验结果及分析

本文进一步通过互补累积分布函数(CCDF, complementary cumulative distribution function)来评估实验中发射信号的PAPR性能，如图8所

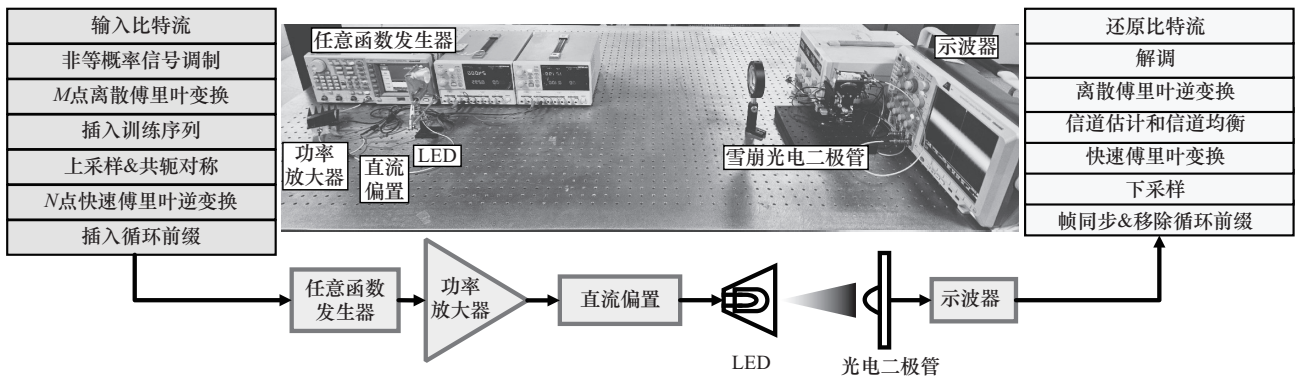


图7 实验装置与系统框架

示。值得注意的是,与表 3 中星座的 PAPR 定义不同,这里的 PAPR 是指 DFT-S-OFDM 数据块的 PAPR,即

$$PAPR_{DFT-S-OFDM} = \frac{\max |y_i|^2}{E[|y_i|^2]}, i=1, \dots, N \quad (3)$$

其中, y_i 为第 i 个 DFT-S-OFDM 实信号, N 为 DFT-S-OFDM 数据块长度,即快速傅里叶变换点数。CCDF 值表示 DFT-S-OFDM 符号块的 PAPR 超过某一阈值的概率。与表 3 中星座 PAPR 结果一致,NEP-68QAM 和 NEP-69QAM 的 PAPR CCDF 值都低于 NEP-72QAM 和 64QAM 的 CCDF 值。NEP-69QAM 的 CCDF 值最低,说明该系统发射信号的 PAPR 最低,其是因为 NEP-69QAM 星座的 PAPR 最低。而 64QAM 星座的 PAPR 最高,因此其对应系统发射信号的 PAPR 也最高,故而 CCDF 值最大。

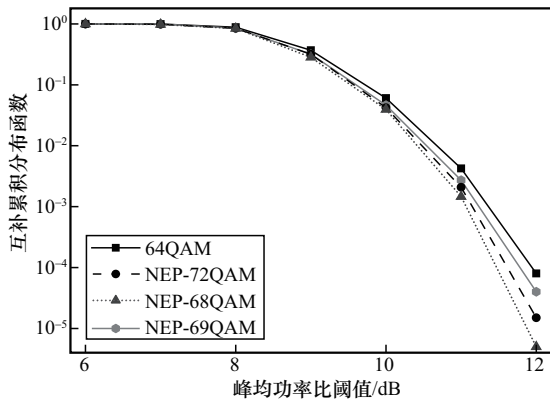


图 8 不同调制方案峰均功率比的互补累积分布函数

图 9 为偏置电流为 100 mA 时,不同驱动峰峰值电压 (V_{pp} , peak-to-peak voltage) 情况下 4 种方案的 BER 性能。在该实验条件下,从 $V_{pp}=300$ mV 开始,LED 就会产生轻微的非线性失真,当 $V_{pp}>600$ mV 时,LED 出现严重非线性失真。可以看到,随着 V_{pp} 的增大,4 条曲线的 BER 都是先减小后增大。一开始,随着 V_{pp} 上升,发射光功率增大,接收信噪比也随之增大,因此 BER 下降。但是,当 $V_{pp}>600$ mV 后,LED 的非线性失真开始占主导因素,并随着 V_{pp} 的增大越来越显著,导致发射信号产生更严重的非线性失真,因此 BER 上升。凭借 MED 和 PAPR 的优势,从 $V_{pp}=300$ mV 开始,3 种非等概率方案的性能均优于传统 64QAM 方案。只有 $V_{pp}=200$ mV 时,NEP-69QAM 性能比 64QAM 略

差,原因是损失了格雷编码增益。由于 PAPR 更低,NEP-68QAM 的性能始终优于 NEP-72QAM。在 $V_{pp}<800$ mV 时,NEP-69QAM 的 BER 高于 NEP-68QAM 和 NEP-72QAM,同样是因为格雷编码增益的损失。但随着 V_{pp} 不断增大,NEP-69QAM 的性能逐渐超越 NEP-68QAM 和 NEP-72QAM,说明 NEP-69QAM 的抗非线性能力最强。考虑 7% 开销硬判决前向纠错 BER 阈值 3.8×10^{-3} ,NEP-68QAM 和 NEP-69QAM 的 V_{pp} 工作范围都达到了 660 mV,比 NEP-72QAM 和 64QAM 分别提升了约 6.5% 和 29.4%。

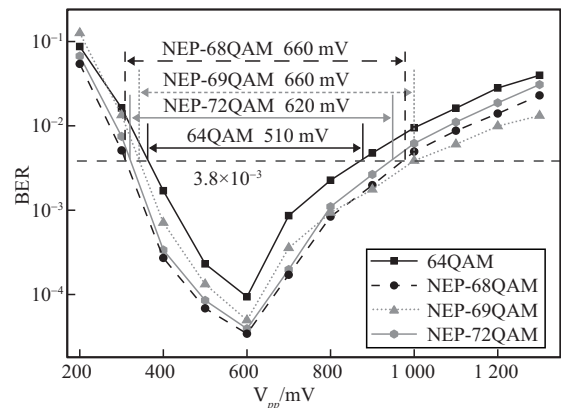


图 9 偏置电流为 100 mA 时,不同驱动电压峰峰值情况下 4 种方案的 BER 性能

图 10 为偏置电流为 150 mA 时,不同驱动电压峰峰值情况下 4 种方案的 BER 性能。当增大直流偏置电流时,接收光功率也会增大,因此 4 种方案的 BER 性能与图 9 中结果相比均得到一定程度提升。但是,偏置电流的增大也导致 LED 的非线性失真变得更为严重, V_{pp} 从 200 mV 开始,LED 就出现非线性效应,当 V_{pp} 增大到 500 mV 时,LED 出现严重的非线性失真。在这种情况下,当 $V_{pp}>700$ mV 时,NEP-69QAM 的性能就开始超越 NEP-72QAM,且随着 V_{pp} 的增大,性能增益逐渐增大。同样考虑 3.8×10^{-3} 的 BER 阈值,当偏置电流增大到 150 mA 后,NEP-69QAM 的 V_{pp} 工作范围达到最大,为 900 mV,比 NEP-68QAM 提升 70 mV。与 NEP-72QAM 和 64QAM 星座相比,NEP-68QAM 将 V_{pp} 工作范围分别提升了 7.8% 和 31.7%,而 NEP-69QAM 更是将 V_{pp} 工作范围分别提升了 16.9% 和 42.9%,相比偏置电流为 100 mA 的情况,性能优势更为明显。

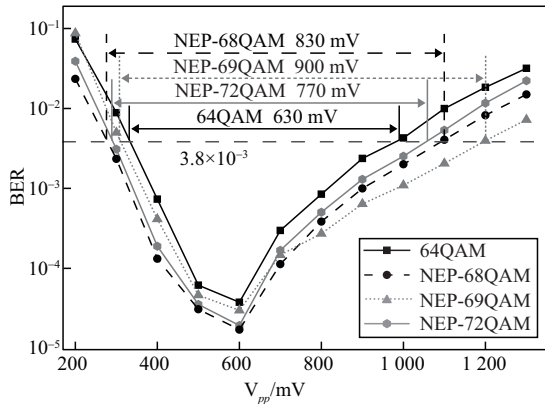
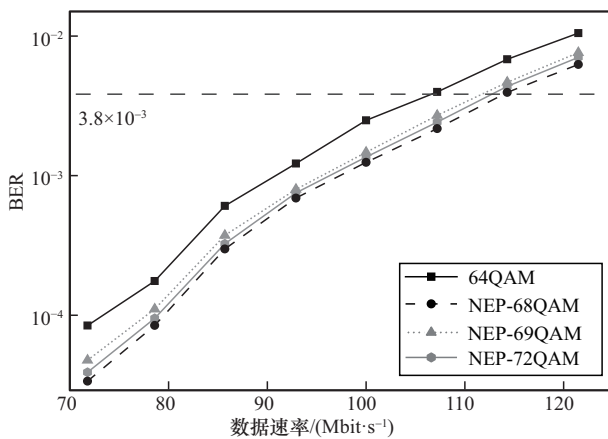


图 10 偏置电流为 150 mA 时,不同驱动电压峰值情况下 4 种方案的 BER 性能

图 11 为不同数据速率下的误码率性能及不同带宽下的接收信号频谱。本文实验通过调整任意函数发生器的采样率来调整数据发送速率。 V_{pp} 和偏置电流设置为图 9 实验中的最佳工作点,即 600 mV 和 100 mA,在 LED 光功率和非线性失真之间获得较好的折中。与图 9 中结果类似,此时,3 种非等概率方案的性能较为接近,NEP-68QAM 性能最好而 64QAM 性能最差,且均随着数据速率的增大 BER 性能呈现下降趋势。这是因为 LED 的频率响应随着频率增大呈指数衰减,图 11 中的接收信号频谱验证了这一现象。当带宽为 25.0 MHz,即任意函数发生器的采样率为 100 MSa/s 时,接收信号的幅频响应较为平坦,但是当带宽增加到 42.5 MHz,即任意函数发生器的采样率为 170 MSa/s 时,接收信号的幅频响应在高频处急剧衰减。在 3.8×10^{-3} 的 BER 阈值下,64QAM 达到的最大数据速率约为 107 Mbit/s,而



(a) 不同数据速率下的 BER 性能

NEP-69QAM 和 NEP-68QAM 分别达到 114 Mbit/s 和 117 Mbit/s 的数据速率,提升了 6.5% 和 9.3%。

图 12 为不同传输距离下不同方案的 BER 性能。本文实验同样固定 V_{pp} 和偏置电流为 600 mV 和 100 mA。随着传输距离的增加,接收光功率降低,即接收端信噪比下降,因此 BER 性能也会下降。同样考虑 3.8×10^{-3} 的 BER 阈值,NEP-69QAM 和 NEP-68QAM 的最大传输距离分别达到了 193 cm 和 208 cm,比 64QAM 分别提升了 20.6% 和 30.0%。

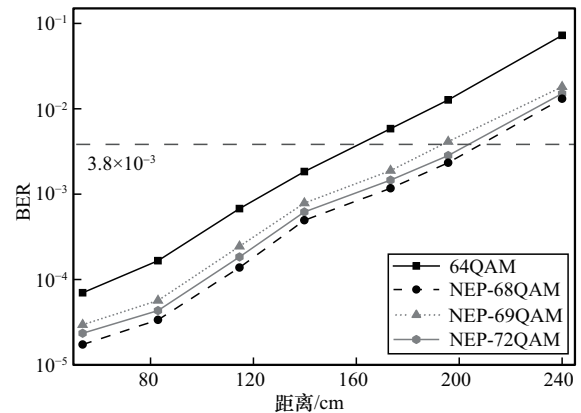
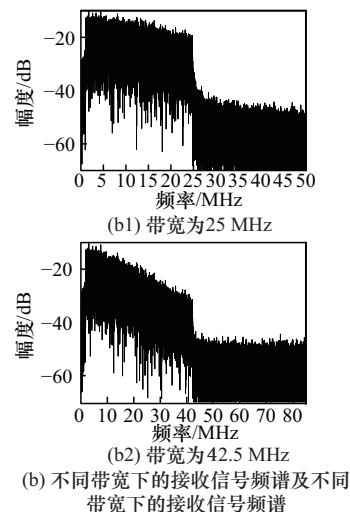


图 12 不同传输距离下不同方案的 BER 性能

4 结束语

本文提出一种基于星座点裂变的非等概率正交幅度调制方案,通过将一个大功率星座点裂变为 2 个功率减半的小功率星座点来生成非等概率信号。尽管星座点个数增加了,即调制阶数升高了,但信源熵保持不变。进一步,本文设计了偶数阶的 NEP-68QAM 和奇数阶的 NEP-69QAM 这 2 种非等概率星



(b) 不同带宽下的接收信号频谱及不同带宽下的接收信号频谱

图 11 不同数据速率下的 BER 性能

座。与基于非线性编码的 NEP-72QAM 星座一样,提出的 2 种非等概率星座保持了 MED 的性能优势,但是相比 NEP-72QAM 具有更低的 PAPR,且实现复杂度更低。相比于偶数阶的 NEP-68QAM 星座,奇数阶的 NEP-69QAM 星座虽然不能实现完全的格雷编码,但是星座 PAPR 更低。最后,本文搭建了实验平台,在不同的驱动 V_{pp} 、偏置电流、数据速率和传输距离情况下评估了 NEP-68QAM 和 NEP-69QAM 星座在真实可见光系统中的性能。实验结果表明,NEP-68QAM 在 LED 非线性较弱时具有最佳的 BER 性能,当 LED 产生严重的非线性失真时,NEP-69QAM 性能更优。以 3.8×10^{-3} 为 BER 阈值,在偏置电流为 150 mA 的情况下,NEP-68QAM 的 V_{pp} 工作范围相比 NEP-72QAM 和 64QAM 分别提升了 7.8% 和 31.7%,NEP-69QAM 更是将 V_{pp} 工作范围分别提升了 16.9% 和 42.9%。由于足够的发射功率是满足 LED 照明要求的必要条件,这一结果对于大功率可见光通信系统的研究具有重要意义。

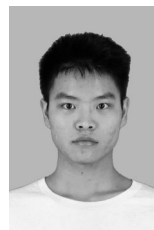
参考文献:

- [1] ALSAEDI W K, AHMADI H, KHAN Z, et al. Spectrum options and allocations for 6G: a regulatory and standardization review[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2023, 4: 1787-1812.
- [2] MATHEUS L E M, VIEIRA A B, VIEIRA L F M, et al. Visible light communication: concepts, applications and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(4): 3204-3237.
- [3] 杨彦兵, 胡超, 鲁邦彦, 等. 基于可见光和射频融合的通信定位一体化系统[J]. 通信学报, 2023, 44(12): 146-157.
YANG Y B, HU C, LU B Y, et al. Integrated communication and positioning system enabled by fusing visible light and RF[J]. Journal on Communications, 2023, 44(12): 146-157.
- [4] NIU W Q, XU Z Y, LIU Y, et al. Key technologies for high-speed Si-substrate LED based visible light communication[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(11): 3316-3331.
- [5] CHI N, ZHOU Y J, WEI Y R, et al. Visible light communication in 6G: advances, challenges, and prospects[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15(4): 93-102.
- [6] ZHAO J Q, QIN C Y, ZHANG M J, et al. Investigation on performance of special-shaped 8-quadrature amplitude modulation constellations applied in visible light communication[J]. Photonics Research, 2016, 4(6): 249-256.
- [7] HU F C, ZOU P, LI G Q, et al. Enhanced performance of CAP-modulated visible light communication system utilizing geometric shaping and rotation coding[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(5): 7905412.
- [8] GUTEMA T Z, HAAS H, POPOOLA W O. WDM based 10.8 Gbit/s visible light communication with probabilistic shaping[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(15): 5062-5069.
- [9] GUO X Y, XU R J. Probabilistically shaped 3D-32QAM constellation design for visible light communication[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2025, 37(10): 583-586.
- [10] DONG Z, CHEN Y F, ZOU D D, et al. DMT transmission in short-reach optical interconnection employing a novel bit-class probabilistic shaping scheme[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(1): 98-104.
- [11] ZHOU Y N, XU Z Y, LU Z L, et al. 47 Gbit/s 100 m ultra-high-speed free-space visible light tricolor laser communication system utilizing time domain hybrid Huffman coding[J]. Optics Express, 2024, 32(14): 24811-24825.
- [12] XU Z Y, LIN X H, LUO Z T, et al. Flexible 2x2 multiple access visible light communication system based on an integrated parallel GaN/In-GaN micro-photodetector array module[J]. Photonics Research, 2024, 12(4): 793-803.
- [13] XU Z Y, NIU W Q, SHI J Y, et al. Nonlinear coded nonuniform superposition QAM by trellis-coding for MISO system in visible light communication[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(4): 042501.
- [14] GUO X Y, LU M X, CHU T T. Study of high-order non-equal probability QAM for visible light communication systems[J]. Optics Letters, 2024, 49(19): 5543-5546.
- [15] ELGALA H, MESLEH R, HAAS H. An LED model for intensity-modulated optical communication systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(11): 835-837.

[作者简介]



郭心悦 (1981-), 女, 江苏常熟人, 博士, 上海理工大学副教授, 主要研究方向为无线光通信技术。



杨宇帆 (2002-), 男, 四川自贡人, 上海理工大学硕士生, 主要研究方向为可见光通信技术。